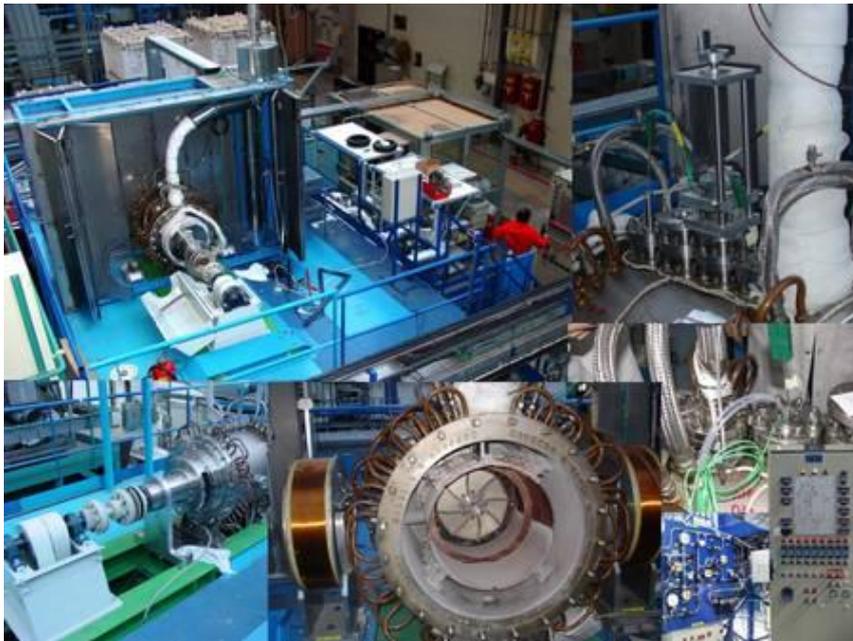


L'expérience VKS a constitué la première démonstration expérimentale de la pertinence du mécanisme de dynamo turbulente auto-excitée pour expliquer la génération du champ magnétique terrestre, avec l'une de ses principales caractéristiques : les inversions quasi périodiques de sa polarité.

Rappelons brièvement que le principe d'une dynamo auto-excitée est de générer un champ magnétique, sans courant électrique initial, à partir d'un mouvement mécanique de rotation. Une représentation simple d'une telle dynamo est celle de la dynamo de Faraday-Bullard (1955) dans laquelle un disque métallique est mis en rotation et se trouve connecté à une bobine. Une légère fluctuation de courant électrique ou magnétique autour d'une moyenne nulle peut alors être amplifiée. Ainsi, un faible courant électrique dans la bobine sera à l'origine d'un champ magnétique dont le flux à travers le disque générera un courant électrique qui, injecté dans la bobine précédente, sera à son tour à l'origine d'un champ magnétique, et ainsi de suite.

Avec son noyau externe conducteur fluide et son mouvement de rotation, les géophysiciens ont proposé, il y a plusieurs décennies, que quelque chose de similaire à la dynamo de Faraday-Bullard pouvait se produire à l'intérieur de la Terre. Mais comment en être sûr ?

C'est dans ce contexte que se sont inscrites les expériences de Karlsruhe, Riga et surtout celle de VKS, au centre de Cadarache.



L'expérience VKS à Cadarache

L'interview qui suit est celle d'un des chercheurs à l'origine de cette expérience ; elle a été réalisée en 2008

Futura-Sciences : Les expériences de Karlsruhe (Allemagne) et Riga (Lettonie) en 2000 sont présentées comme une étape clé dans la validation expérimentale de la théorie de la dynamo auto-excitée. Pourtant le principe de cette théorie est assez ancien puisqu'il remonte aux travaux de Joseph Larmor en 1919, à propos des taches solaires. S'agissait-il vraiment des premières expériences en laboratoire pour tenter de reproduire le mécanisme de génération du champ magnétique terrestre ?

Jean-François Pinton : Pas du tout. Il s'agissait des premières expériences basées sur l'écoulement d'un fluide conducteur, et donc reproduisant quelque peu ce qui se passe dans le noyau fluide de la Terre composé d'un alliage fer-nickel. Mais les tentatives expérimentales pour générer un champ magnétique à partir d'un mouvement mécanique sont assez anciennes.

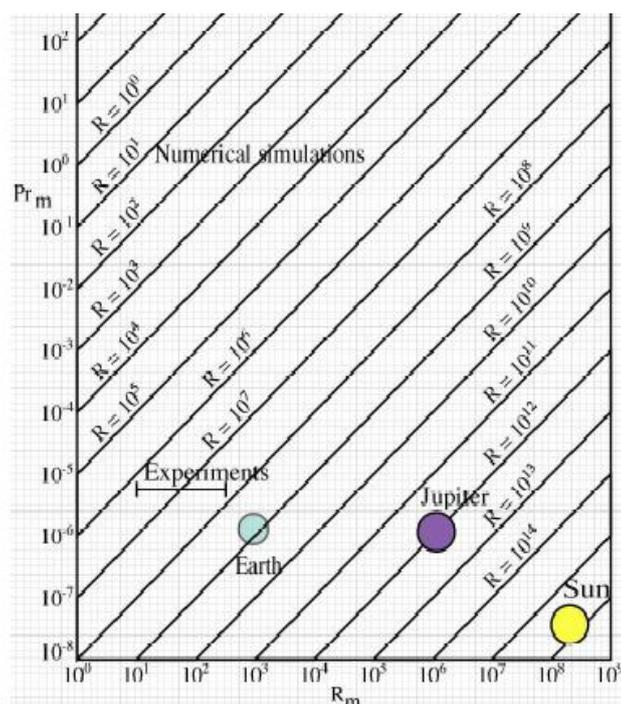
Ainsi, on trouve déjà un moteur mis au point par Siemens, au dix-neuvième siècle, dont le fonctionnement est très proche de celui des dynamos auto-excitées. En fait, la première dynamo obtenue en laboratoire était celle de Lowes et Wilkinson, en 1963. Il s'agissait de deux cylindres métalliques homogènes, tournant sur eux-mêmes, et dont les axes formaient un angle droit. Remarquablement, des effets chaotiques riches, avec inversion du champ magnétique, pouvaient déjà être obtenus.

Futura-Sciences : En quoi l'expérience VKS est-elle un progrès significatif par rapport à celles de Karlsruhe et Riga ?

Jean-François Pinton : Dans ces deux expériences, l'écoulement fluide est très contraint géométriquement. C'est particulièrement le cas de l'expérience de Karlsruhe où les lignes de courant du sodium liquide doivent suivre une série de tubes. On ne peut pas beaucoup changer les paramètres et surtout le niveau de turbulence n'est pas très élevé. On se rapproche des conditions régnant dans le noyau de la Terre mais ce n'est pas encore suffisamment réaliste. De fait, les deux expériences ont bien démontré qu'un champ magnétique pouvait être spontanément engendré. Dans le cas de l'écoulement de Von Karman, produit par les deux rotors de l'expérience VKS, on peut obtenir des écoulements beaucoup plus turbulents et moins contraints.

Futura-Sciences : On sait qu'en hydrodynamique, à partir des caractéristiques géométriques et dynamiques d'un écoulement fluide autour d'un objet, on peut construire certains nombres sans dimension qui permettent de caractériser cet écoulement. On peut ainsi simuler, en réduction, des écoulements possédant des caractéristiques géométriques et dynamiques différentes, mais des nombres sans dimension associés identiques. C'est le principe des expériences en soufflerie pour tester des modèles d'avions. Dans le cas de VKS, s'agit-il vraiment d'une dynamo terrestre en réduction ?

Jean-François Pinton : Eh bien non... Si l'on construit un diagramme avec ce que l'on appelle des nombres de Reynolds et de Prandtl magnétiques, caractérisant des écoulements de fluides turbulents et conducteurs de l'électricité, on se rend compte que l'on n'est pas en présence d'une simulation des conditions d'écoulement dans le noyau fluide et en convection de notre planète. Heureusement, cela suffit pour que l'on observe déjà nombre de caractéristiques du champ magnétique terrestre et même des étoiles.



En abscisse le nombre de Reynolds magnétique et en ordonnée le nombre de Prandtl magnétique.

Futura-Sciences : VKS apparaît comme une machine à la limite des possibilités technologiques. Est-ce exact ?

Jean-François Pinton : Absolument ! Les turbines agitant les 150 litres de sodium liquide tournent à 2.000 tours par minute et il faut maintenir une température de 120 °C, avec des fluctuations de moins de 5 °C. Les techniciens et les ingénieurs qui ont réalisé cela ont fait des prouesses dignes de ceux s'occupant de la mise au point des Formules 1. D'ailleurs, si l'on considère l'énergie injectée dans le dispositif par unité de masse, on aboutit à des ratios proches de la F1 : 1 kW par kg. Il y a un autre point commun avec les Formules 1 : ce sont les conditions dans lesquelles il faut travailler dans le bâtiment de deux étages et de 100 m² de surface de base. Le sodium est chaud et, de plus, il est hautement inflammable. Nous sommes donc parfois obligés de porter des combinaisons de protection et d'isolation, comme les pilotes de F1.



Des membres de la collaboration VKS équipés pour intervenir sur la machine.

Futura-Sciences : Vous avez retrouvé un comportement similaire à celui de la dynamo terrestre. Il semblerait que les comportements du Soleil et d'autres étoiles puissent être aussi retrouvés, par un ajustement approprié des conditions de l'écoulement turbulent dans VKS

Jean-François Pinton : Tout à fait. Vous savez que le Soleil possède un cycle de taches solaires de 11 ans et un autre lié au champ magnétique. Là aussi, le champ magnétique s'inverse mais cela ne se passe pas de la même façon que sur Terre.

Dans le cas de notre planète, le champ passe d'un état de polarité à un état opposé avec des intervalles de temps aléatoires (même si au final une moyenne périodique émerge) et la durée des transitions d'un état à l'autre est très courte. Les périodes de temps pendant lesquelles le champ est stable ont une durée variable mais toujours plus longue que le temps nécessaire à un renversement.

Dans le cas du Soleil, la période est très courte, 22 ans, et très stable, avec une géométrie très particulière du champ magnétique, dominant à l'équateur. En changeant les paramètres définissant le flot turbulent dans l'expérience VKS, comme la différence entre les vitesses de rotation des deux turbines, nous voyons apparaître ces différents régimes de dynamos.

On trouve aussi des comportements qui ressemblent à ceux observés dans certaines étoiles, comme de l'intermittence et une connexion entre la vitesse de rotation de l'étoile et la périodicité de son champ magnétique. Nous voulons comprendre comment ces différentes dynamos sont reliées entre elles, en fonction de la modification des paramètres de l'écoulement turbulent.

Futura-Sciences : On sait que l'effet dynamo ne se retrouve pas seulement au sein des étoiles et des planètes mais aussi d'autres objets astrophysiques, comme les galaxies ou les étoiles à neutrons. L'expérience VKS peut-elle nous en apprendre plus sur ces objets ?

Jean-François Pinton : J'aime à répéter que nous nous sommes effectivement offert un bout d'astrophysique en laboratoire. Malgré tout, il reste quantité de situations dynamos qui nous sont inaccessibles. La physique des objets fortement conducteurs et fortement visqueux n'est pas reproductible avec notre machine. Nous ne pouvons donc pas étudier le champ magnétique d'objets naturels comme les étoiles à neutrons, par exemple. Par contre, on s'interroge sur la possibilité d'explorer, avec VKS, certains des processus magnétohydrodynamiques qui interviennent au niveau des disques d'accrétion dans les systèmes binaires, ou lors de la formation des disques protoplanétaires. On aimerait bien comprendre aussi ce qui se passe lorsque qu'une planète se forme et qu'une partie de l'énergie d'accrétion de la matière passe dans l'énergie stockée sous forme magnétique.

Futura-Sciences : La magnétohydrodynamique intervient de façon importante lorsque l'on cherche à faire de la fusion contrôlée. On se trouve alors aux prises avec des problèmes d'instabilité magnétohydrodynamique, d'apparition de comportements chaotiques, etc. C'est justement le genre de choses auxquelles sont aussi confrontés les astrophysiciens et les géophysiciens qui se penchent sur les champs magnétiques. Alors, se pourrait-il que VKS soit indirectement un moyen de faire progresser la recherche sur la fusion contrôlée et la réalisation du programme Iter ?

Jean-François Pinton : Cela n'est effectivement pas impossible. D'ailleurs des chercheurs liés à la magnétohydrodynamique en physique, géophysique ou astrophysique se sont souvent penchés sur les phénomènes liés aux tokamaks, comme ceux survenant dans l'expérience Tore Supra à Cadarache.